

# Módulo de procesamiento de señal de un MIMO-Testbed OFDM para medidas de antenas reconfigurables

C. Gómez-Calero, J. Mora, L. Cuéllar, L. de Haro, R. Martínez  
{carlosgc,jmora,luiscln,leandro,ramon}@gr.ssr.upm.es  
Departamento de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones  
Universidad Politécnica de Madrid  
Ciudad Universitaria s/n, 28040 Madrid.

**Abstract**—Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) systems have been considered as a solution to increase the data rate and quality of signals in the next generation wireless communication systems. The performances of these systems depend on three main aspects: channel propagation characteristics, processing algorithms and antenna array configurations. In order to obtain MIMO channel measurements at ISM band (2.45 GHz) taken into account the use of different antennas such as reconfigurables, a MIMO-testbed which uses OFDM technique has been designed and implemented in order to carry out the measurements in indoor scenarios. In this paper, the signal processing module is described which is based on Software-Radio platform.

## I. INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente se han usado diversos métodos de multiplexación para optimizar las fuentes disponibles, tales como la frecuencia, tiempo o código. En los últimos años, la explotación del dominio espacial también ha sido considerada como un modo muy interesante de incrementar la capacidad de los sistemas inalámbricos. Por lo tanto, se han considerado nuevos métodos y esquemas para hacer uso de la diversidad espacial del canal, tales como el uso de múltiples antenas a ambos lados del radioenlace, conocido como sistemas MIMO (Multiple-Input Multiple-Output). Estos sistemas basan su configuración en situar múltiples antenas a ambos lados del enlace con el objetivo de obtener diversidad o multiplexación espacial. Varios estudios teóricos [1], [2] han demostrado un incremento en capacidad con el despliegue de estos sistemas.

Por otro lado, la técnica de OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) ha sido adoptada para la transmisión de señales sobre canales inalámbricos en varios estándares de sistemas como son el DAB, DVB-T y los estándares IEEE 802.11a/g de LAN y IEEE 802.16a, MAN. Además, esta técnica se presenta como un candidato potencial para la 4G de comunicaciones móviles inalámbricas. En este sentido, se han realizado diversos estudios y esquemas para utilizar sistemas MIMO con OFDM como son [3], [4]. Además, se está desarrollando el estándar IEEE 802.11n para introducir MIMO con OFDM en sistemas WLAN.

Las prestaciones logradas en un sistema MIMO depende principalmente de tres aspectos: las características de propagación del canal, los algoritmos MIMO usados en transmisión y recepción y, finalmente, la configuración del array de antena con sus características de radiación.

Así pues, para evaluar las prestaciones de las diferentes antenas, esquemas de codificación y medias de canal en diferen-

tes entornos se han desarrollado prototipos y demostradores. En este artículo se describe el diseño y la implementación del procesamiento de señal, basado en Software-Radio, de un demostrador MIMO de banda ancha a 2.45 GHz que incluye OFDM. Una de las ventajas de este demostrador es que permite medidas de canales MIMO para diferentes tipos de antena y configuraciones, como son las antenas reconfigurables [5].

## II. MIMO-TESTBED

El esquema general del MIMO testbed es el mostrado en la Fig. 1. Permite la utilización de hasta 4 antenas tanto en el transmisor como en el receptor. El funcionamiento del sistema es como sigue: en primer lugar se generan las señales a transmitir en el PC. Esto se realiza en lo que llamaremos procesamiento en tiempo diferido (*offline*). Una vez esas señales generadas, se introducen a la parte de procesamiento en tiempo real (*online*), que está formado por plataformas SDR (Software-Defined Radio) y se encarga de enviar las señales al siguiente subsistema. Éste es el denominado módulo o subsistema de radiofrecuencia RF y tiene como objetivo amplificar, filtrar y subir las señales en frecuencia para su envío. Para que eso ocurra, es necesario el subsistema de antena, cuya finalidad reside en transmitir al medio las señales procedentes de la etapa anterior. Además, cabe señalar que la señal transmitida se centra en la frecuencia de 2.45 GHz. En el lado del receptor se realiza la operación contraria al caso del transmisor. Es decir, se reciben las señales a través de las antenas, se amplifican, filtran y bajan en frecuencia, se muestrean y se envía al PC receptor para su posterior procesamiento *offline*. Además, se añade un módulo que controla las diferentes configuraciones de la antena reconfigurable bajo medida.

## III. PLATAFORMA SOFTWARE-RADIO

El módulo de procesamiento del demostrador MIMO se encarga de realizar las tareas correspondientes al procesamiento de señal, tanto en transmisión como en recepción. Para describirlo, este apartado se divide en las siguientes partes: la plataforma SDR utilizada (procesado *online*), la comunicación entre los DSPs y el PC y, por último, el procesamiento *offline*.

En lo que referente al procesamiento en tiempo real, se han utilizado plataformas DSP TMS320C6203 de Texas Instruments y FPGAs Virtex II de Xilinx. Las cuatro cadenas transmisoras digitales se implementan en una placa DSP Quad Pentek 4292

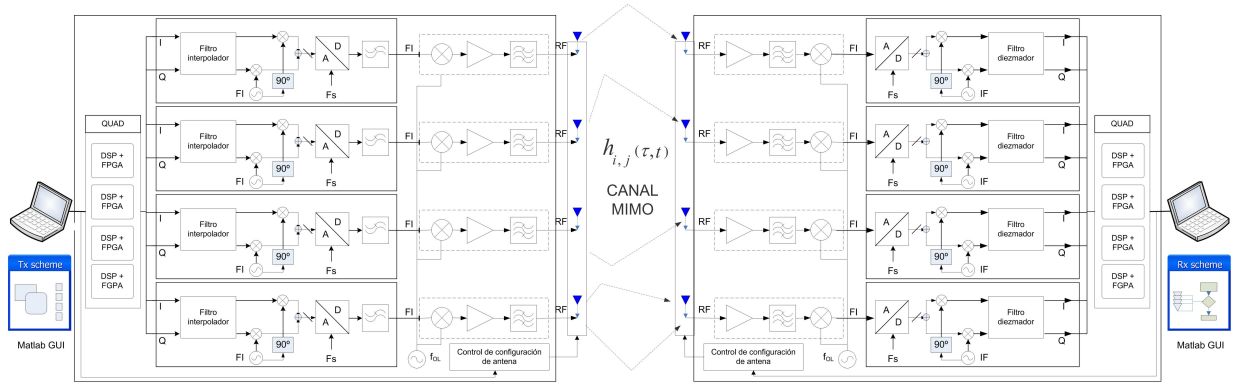


Fig. 1. Esquema general del MIMO testbed

y dos placas *upconverters* digitales Pentek 6229. En el lado correspondiente a la recepción, las cuatro cadenas receptoras consisten en otra placa DSP Quad Pentek 4292 y dos placas digitales *downconverters* Pentek 6235.

La señal enviada desde el PC es recibida y almacenada en la memoria SDRAM de cada uno de los DSPs correspondientes. A continuación, se envían dichas señales al transmisor digital 6229 que se encarga de filtrar y subir la señal de banda base a una FI de 40 MHz para su posterior conversión digital a analógico y salida a la parte de RF. Para ello, es necesaria una sincronización de los transmisores digitales con el objetivo de que todas las antenas transmitan la información a partir del mismo instante de tiempo. En recepción se realiza la operación inversa.

La comunicación entre los módulos de FPGAs-DSPs y los PCs se lleva a cabo a través de librerías específicas para las plataformas SDR seleccionadas, lo que permite la comunicación con Matlab vía protocolo TCP/IP. Esto es posible gracias al *stream* API de Swiftnet, que provee un medio para mover *streams* de datos entre el *host* y la placa en tiempo real.

#### IV. PROCESADO DE SEÑAL

Debido a que el objetivo es tener un demstrador de banda ancha, se empleará la técnica OFDM, ya que es eficiente para transmitir datos sobre canales selectivos en frecuencia. La idea principal es dividir en frecuencia un canal de banda ancha en estrechos subcanales. Así, cada subcanal es un canal con desvanecimiento plano a pesar de la naturaleza selectiva en frecuencia de un canal de banda ancha. Para generar dichos subcanales en OFDM, se aplica una transformada rápida inversa de Fourier (IFFT) a un bloque de  $N$  símbolos de datos:

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j \frac{2\pi f_c k n}{N}} \quad (1)$$

Para evitar interferencia entre símbolos (ISI) debida al ensanchamiento del retardo del canal, se insertan en el bloque un prefijo cíclico. Este prefijo cíclico se conoce como intervalo de guarda (GI), donde el número de muestras del prefijo cíclico, debería ser mayor que la longitud de la respuesta al impulso del canal. Los efectos de las muestras del prefijo cíclico eliminan la ISI y convierten la convolución entre los símbolos transmitidos y el canal a una convolución circular. Así pues, la transformada rápida de Fourier (FFT) se utiliza en el receptor para recuperar el bloque de símbolos recibidos.

TABLA I  
PARÁMETROS PRINCIPALES DE LA SEÑAL OFDM

Parámetro	Símbolo	Valor
Frecuencia de muestreo	$F_s$	6.25 MHz
Tiempo útil de símbolo	$T_u$	$1024/F_s = 163.84 \mu s$
Tiempo de guarda	$T_g$	$T_s/8 = 40.96 \mu s$
Tiempo de símbolo	$T_s$	$184.32 \mu s$
Separación entre portadoras	$\Delta f$	$1/T_u \approx 6.1 \text{ kHz}$
Número de portadoras	$N$	768
Ancho de banda	$BW$	4687500 Hz

En la Tabla I se detallan los parámetros más característicos del sistema.

#### A. Estructura de trama

En el transmisor se genera continuamente una trama compuesta por 8 símbolos OFDM, como muestra la Fig. 2. El primer símbolo se utiliza para sincronización del receptor y es un símbolo nulo. Después, se introduce el símbolo de referencia que se utilizará en el receptor para estimar el canal. Posteriormente se incluyen 6 símbolos de datos. Éstos, debido a que el objetivo es medir el canal, se generan aleatoriamente.

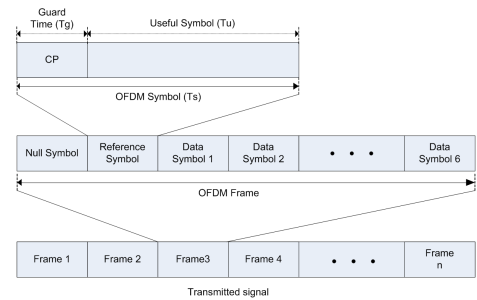


Fig. 2. Estructura de la trama enviada

#### B. Estimación de canal

La estimación de canal en sistemas MIMO es una etapa muy importante ya que, en los sistemas MIMO las prestaciones de los algoritmos dependen de dicha estimación.

La señal recibida en cada portadora viene dada por la siguiente expresión

$$\mathbf{R}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{N}_k \quad (2)$$

donde  $\mathbf{X}$  es el vector de señales enviadas por cada antena,  $\mathbf{H}$  indica la matriz del canal MIMO y  $\mathbf{N}$  representa el ruido en el canal, todo ello para la subportadora  $k$ -ésima. La matriz del canal MIMO viene expresada según

$$\mathbf{H}_k = \begin{bmatrix} h_{1,1,k} & \cdots & h_{1,M_T,k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M_R,1,k} & \cdots & h_{M_R,M_T,k} \end{bmatrix} \quad (3)$$

donde cada elemento de la matriz representa la respuesta del canal entre cada par de antenas transmisor-receptor.

Por otro lado, se han estudiado diferentes maneras de obtener el canal. Para ello, utilizaremos como pilotos códigos ortogonales que permitan en el receptor separar las diferentes contribuciones de cada antena. Debido a que el número de antenas máximo es 4, es necesaria una matriz de  $4 \times 4$  elementos. En nuestro caso, utilizaremos la matriz de pilotos:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

donde el número de filas representa el espacio y las columnas pueden representar tanto el tiempo como la frecuencia. En una primera opción se eligió la frecuencia, por lo que de este modo, se asumía que el canal era invariante en 4 subportadoras. Sin embargo, y con el objetivo de medir canales selectivos en frecuencia, se optó por el tiempo como eje en las columnas.

Para una mejor sincronización en el receptor, multiplicamos la matriz de pilotos  $\mathbf{P}$  por una señal pseudoaleatoria ( $S$ ). Así pues, en el receptor para cada subportadora  $k$ , tendremos (2) con

$$\mathbf{X}_k = S_k \mathbf{P} \quad (5)$$

Si tomamos

$$\mathbf{Y}_k = \mathbf{X}_k^H (\mathbf{X}_k \mathbf{X}_k^H)^{-1} \quad (6)$$

para estimar el canal multiplicamos la señal recibida por  $\mathbf{Y}$ , obteniendo:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{H}}_k &= \mathbf{R}_k \mathbf{Y}_k \\ &= \mathbf{H}_k (S_k \mathbf{P}) \mathbf{Y}_k + \mathbf{N}_k \mathbf{Y}_k \\ &= \mathbf{H}_k + \mathbf{N}_k \mathbf{Y}_k \end{aligned} \quad (7)$$

En la Fig. 3 se muestra el canal MIMO estimado basado en el esquema anterior utilizando el testbed. Para ello, se unieron cada antena transmisora con su respectiva receptora ( $h_{11} = h_{22} = h_{33} = h_{44} = 1$ ), con el objetivo de ver la ortogonalidad de los pilotos.

Por otro lado, y una vez que se ha obtenido el canal en el receptor, se calcula la capacidad del canal MIMO. Dado que no se conoce el canal en el transmisor y por ende, se distribuye equitativamente la potencia por cada una de las antenas transmisoras, la capacidad en cada subportadora  $k$  viene expresada por

$$C_k = \log_2 \left[ \det \left( \mathbf{I}_{M_R} + \frac{\rho}{M_T} \mathbf{H}_k \mathbf{H}_k^H \right) \right] \text{ bps/Hz} \quad (8)$$

donde  $\mathbf{I}_{M_R}$  es la matriz identidad de tamaño  $M_R \times M_R$ ,  $M_T$  es el número de antenas transmisoras y  $\rho$  es la relación señal a ruido.

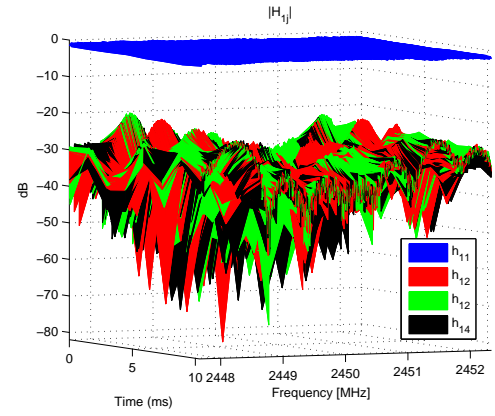


Fig. 3.  $|\hat{h}_{1j}(t, f)|$  para el caso medido de  $h_{11} = 1$ ,  $h_{ij} = 0$  para  $i \neq j$

## V. RECEPTOR

El receptor del MIMO-Testbed es la parte más compleja del sistema. Una vez que las señales son bajadas a banda base y convertidas de analógico a digital, pasan a ser procesadas en la FPGA donde se realiza el sincronismo y la FFT.

### A. Módulo de sincronismo

El módulo de sincronismo se encarga de estimar el comienzo del símbolo de referencia que sigue al símbolo nulo dentro de la trama. Genera como salidas la señal que recibe a la entrada, una señal que indica un intervalo donde esta contenido el símbolo de referencia, una señal que indican el comienzo del símbolo de referencia dentro de ese intervalo y los valores del máximo del resultado de la autocorrelación dentro del intervalo (Fig. 4).

El módulo detector de símbolo es una máquina de estados que detecta el final del símbolo nulo, genera una ventana temporal que nos asegure que hemos almacenado el símbolo de referencia completo y mientras observa el resultado de la autocorrelación para localizar el índice que se corresponde con el inicio del símbolo. Para la sincronización en el tiempo con el símbolo de referencia y estimar el CFO (Carrier Frequency Error) nos valemos del esquema basado en la autocorrelación del prefijo cíclico [6].

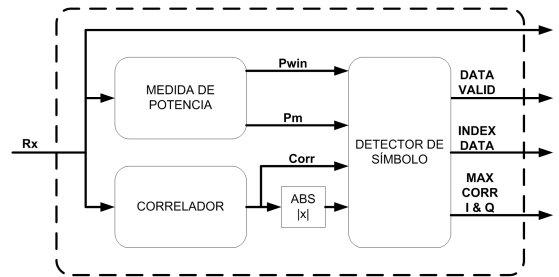


Fig. 4. Módulo de sincronismo

### B. Módulo FFT

Este módulo recibe las señales de salida de los módulos de sincronismo de los canales 1 y 2. Las señales se almacenan en un buffer independiente para cada uno de los canales. La escritura en estos buffers esta controlada por la señal que se genera en el módulo de sincronismo. Cuando ambos buffers están llenos, tenemos una captura completa del símbolo de

referencia para ambos canales. La máquina de estados al detectar este evento manda secuencialmente los 1024 datos del símbolo, a partir del índice, al módulo que realiza la FFT de 1024 puntos. Este módulo es compartido por el canal 1 y 2, debido al alto consumo de recursos en la FPGA. La máquina de estados se encarga de conmutar entre los datos de los 2 canales y almacenarlos en el buffer de salida correspondiente.

## VI. ERRORES DE IMPLEMENTACIÓN

Al ser un sistema real, se han analizado también los aspectos de implementación, tales como errores de frecuencia por tener distintos relojes de muestreo en transmisión y recepción, así como los errores producidos por usar distintos osciladores locales, distintos relojes internos a ambos lados del enlace radio, ya que es necesaria una sincronización, estimación del offset de frecuencia y posterior corrección. Teniendo todo lo anterior en cuenta, podemos incluir todos estos errores, obteniendo las señales recibidas según

$$\mathbf{R}_k = \mathbf{X}_k \mathbf{H}_k \cdot e^{j(2\pi k \frac{T_d}{T_u} + 2\pi k \frac{\Delta t(n)}{T_u} + \phi_0 + 2\pi k \Delta f T_s)} + \mathbf{I}_k + \mathbf{N}_k \quad (9)$$

donde  $T_d$  representa el offset temporal del símbolo,  $\Delta t$  el offset temporal del muestreo,  $\phi_0$  el offset de fase,  $\Delta f$  el offset de frecuencia y  $\mathbf{I}_k$  es la ICI (Inter-Carrier Interference) debida al offset de frecuencia para la portadora  $k$ -ésima.

Estos errores se han tratado en la etapa de procesamiento de manera que se han mitigado estos efectos, teniendo mucho cuidado de corregir todos los errores sin afectar a la matriz del canal, ya que si corregimos toda la fase, eliminaremos el efecto del canal de propagación.

## VII. APLICACIÓN MIMO-TESTBED

Uno de los principales objetivos del testbed MIMO de banda ancha es que permita realizar medidas de antenas reconfigurables en diferentes entornos. Así pues, se ha desarrollado una herramienta de fácil manejo diseñada en el entorno Matlab para la integración de la parte de procesamiento y la parte de medidas. Concretamente, en la Fig. 5. se muestra la ventana principal de la aplicación, donde se van mostrando los puntos medidos, las señales recibidas y la capacidad MIMO del canal obtenida.

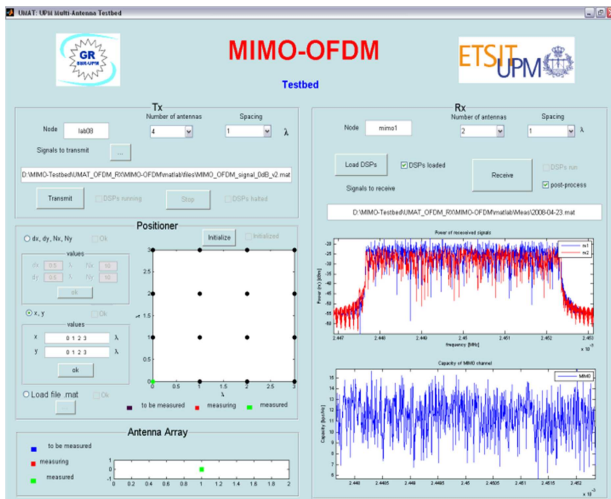


Fig. 5. Ventana principal de la aplicación

Cabe señalar que el testbed tiene un scanner que puede barrer cualquier punto en un área de hasta  $6\lambda \times 6\lambda$  [7]. El esquema de funcionamiento es el siguiente: en cada punto de medida, se reciben 32 símbolos de pilotos donde se estima el canal, de modo que obtendremos la respuesta del mismo tanto en frecuencia como en tiempo. Una vez hecho esto, se cambia la configuración del array de antenas mediante un switch conectado al PC por un puerto RS232 y se vuelve a medir. Cuando se terminan las configuraciones, se cambia el punto del scanner y se vuelve a hacer todo el proceso. Esto se detalla en la Fig. 6, donde se muestra el diagrama de flujo del sistema de medida.

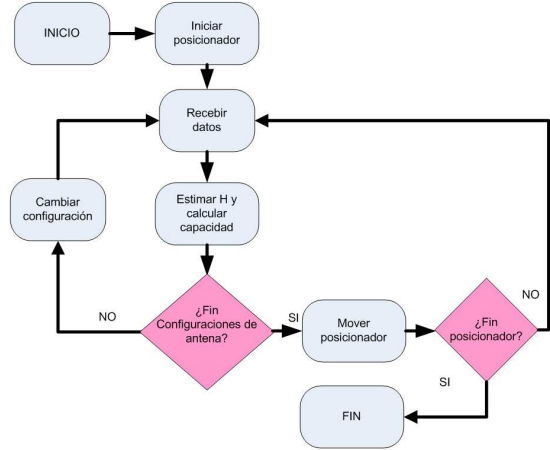


Fig. 6. Diagrama de flujo del testbed

## VIII. CONCLUSIONES

Se ha presentado el diseño e implementación del módulo correspondiente al procesamiento de señal de un medidor de canal MIMO de banda ancha a la frecuencia de 2.45 GHz. El MIMO testbed utiliza la técnica OFDM, así como pilotos ortogonales para la estimación de canal. La etapa de sincronismo y FFT en el receptor se realiza en una FPGA. Además, se han presentado los errores encontrados debidos a la implementación real, así como se ha descrito el funcionamiento del testbed para el uso de antenas reconfigurables.

## REFERENCIAS

- [1] A. Paulraj, D. Gore, R. Nabar, and H. Bölcskei, "An overview of MIMO communications - A key to gigabit wireless," *Proceedings of the IEEE*, vol. 92, no. 2, pp. 198 – 217, 2004.
- [2] A. Goldsmith, S. Jafar, N. Jindal, and S. Vishwanath, "Capacity limits of MIMO channels," *IEEE Journal on selected areas in communications*, vol. 21, no. 5, June 2003.
- [3] H. Sampath, S. Talwar, J. Tellado, V. Erceg, and A. Paulraj, "A fourth-generation MIMO-OFDM broadband wireless system: design, performance, and field trial results," *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, no. 9, pp. 143–149, September 2002.
- [4] H. Bölcskei, D. Gesbert, and A. Paulraj, "On the capacity of OFDM-based spatial multiplexing systems," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 50, no. 2, pp. 225–234, February 2002.
- [5] B. Cetiner, H. Jafarkhani, Q. Jiang-Yuan, J. H. J. Yoo, A. Grau, and F. D. Flaviis, "Multifunctional reconfigurable MEMS integrated antennas for adaptive MIMO systems," *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, no. 12, pp. 62–70, December 2004.
- [6] J. van de Beek, M. Sandell, and P. Borjesson, "ML estimation of time and frequency offset in OFDM systems," *Signal Processing, IEEE Transactions on [see also Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE Transactions on]*, vol. 45, no. 7, pp. 1800–1805, Jul 1997.
- [7] J. Mora-Cuevas, C. Gómez-Calero, L. Cuéllar, and L. de Haro, "A Wideband OFDM MIMO Measurement System for Antenna Evaluation," *Antennas and Propagation International Symposium, 2008 IEEE*, 5-12 July 2007.